

УДК: 571.44

А.Б. Климчук,  
Г.Н. Амеличев,  
Б.А. Вахрушев,  
Г.В. Самохин

## **ОТ МОРСКОЙ И ЛЕДНИКОВОЙ ИЗОТОПНЫХ ШКАЛ К СПЕЛЕОТЕМНОЙ ХРОНОЛОГИИ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ**

Украинский Институт спелеологии и карстологии МОН Украины и НАН  
Украины, г. Симферополь

**Аннотация.** В статье приведены сведения об особенностях создания и использования изотопных палеотемпературных шкал, основанных на данных изучения морских осадков и ледниковых кернов. Рассматриваются преимущества палеоклиматических летописей, базирующихся на спелеотемном материале. Приводятся результаты первых датировок из пещер Крыма и Кавказа.

**Ключевые слова:** палеоклимат, изотопная термометрия, спелеотемы, абсолютная датировка, палеотемпературная шкала.

Анализ и расшифровка летописи палеоклимата и других палеогеографических условий имеют фундаментальное значение для определения современного состояния и будущих изменений климата и окружающей природной среды. Они необходимы для оценки следствий этих изменений и разработки соответствующих управленческих решений долгосрочного социально-экономического развития регионов. Прогнозирование долгосрочных тенденций изменений природной среды планеты (глобальное потепление, повышение уровня Мирового океана, и т.п.) требует знания механизмов функционирования климатической системы Земли в масштабах геологического времени. Изучение этих механизмов невозможно без детальной информации о прошлых изменениях климата. От детальности и точности таких палеореконструкций также зависит решение многих проблемных вопросов региональной геологии и палеогеографии, в том числе практических аспектов, которые касаются разведки и эксплуатации минеральных ресурсов и прогноза опасных природных явлений.

Реконструкции климатических изменений плейстоценовой эпохи до недавнего времени базировались главным образом на данных изучения морских осадков и ледниковых кернов Антарктики и Гренландии (рис. 1, А). Однако для построения общей модели климатических изменений Земли необходимы также исследования палеоклиматических летописей континентального происхождения, которые напрямую характеризуют термический режим без буферного эффекта, присущего океаническим данным (соленость, глубина вод). Отчасти эти исследования осуществляются с помощью палеонтологических, палинологических и других методов (рис. 1, Б). Однако почти всегда ныне используемые объекты исследования географически узко локализованы либо охватывают незначительный временной отрезок геохронологической шкалы. Палеоклиматическая интерпретация, полученная по ледниковым данным, с определенной осторожностью может быть распространена на регионы, не подвергавшиеся оледенению. Таким образом, основной проблемой большинства имеющихся континентальных архивов является их временная фрагментарность, низкая разрешающая способность, а также ограниченные возможности получения точно датированных палеоклиматических данных.

Главным моментом палеоклиматических реконструкций является определение объектов-индикаторов, способных сохранить и донести без изменений информацию о температурах и по возможности влажности былых географических обстановок. Второй момент – наличие методик выявления достоверных климатических палеосигналов. Палеотемпературный сигнал из морских осадков извлекается масс-спектрометрически – по отношению изотопов  $^{18}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}$  в углекислоте органического кальцита из ростров белемнитов, и химико-аналитически – по отношению кальция и магния в кальците раковин морских беспозвоночных.

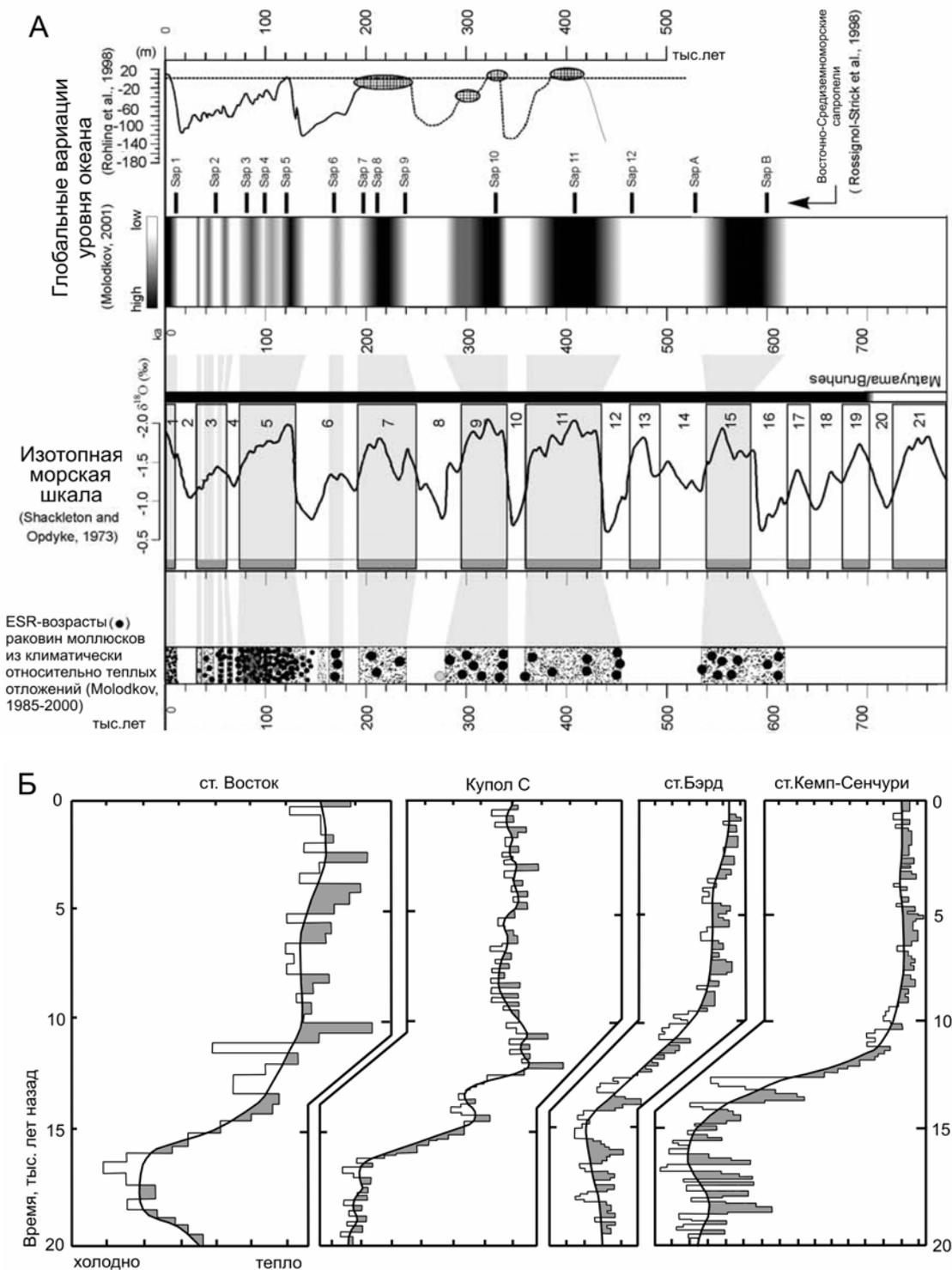


Рис. 1. Хронология и корреляция основных палеоклиматических событий по материалам морских осадков (А) и ледниковых кернов (Б) Антарктиды и Гренландии [16, 10].

Обоснование и развитие метода изотопной палеотермометрии связаны с фундаментальными исследованиями зарубежных (Г. Юри, Р. Боуэна, Г. Лоуэнстама, С. Эпштейна, Ц. Эмилиани) и отечественных (Р.В. Тейс, Д.П. Найдин) ученых. Концентрация изотопов кислорода в природных водах зависит от температуры. Установлено равновесное распределение тяжелого и обычного изотопов кислорода в воде и

органогенных карбонатах. Следовательно, при сохранении первичного изотопного состава кислорода в раковинах и скелетах ископаемых организмов можно определить древние температуры.

Согласно Геологическому словарю [6] широкое применение метода изотопной палеотермометрии сдерживается неравновесным накоплением изотопов кислорода в раковинах некоторых организмов и водной среде, зависимостью концентрации изотопов кислорода от водного фона (солёности воды), нарушением первичного изотопного состава кислорода в ходе диагенетических преобразований скелетных карбонатов (загрязнение, вторичный обмен, перекристаллизация, полиморфизм карбоната кальция и т. д.). Многочисленные экспериментальные данные однозначно свидетельствуют о невозможности использования для палеотемпературных определений скелетов организмов, дышавших кислородом воздуха. Мало перспективны скелеты организмов, обитавших в приливно-отливной зоне моря, скелеты известковых водорослей и кораллов, которые в процессе жизнедеятельности могли соприкасаться с воздухом, и организмы, имевшие пористый скелет.

Для палеотемпературных определений изотопным методом обычно используются скелеты фораминифер, брахиопод, двустворчатых моллюсков и особенно ростры белемнитов, т. е. организмов, обитавших в нормально-солёных морских бассейнах и имевших первичный кальцитовый состав органогенных карбонатов.

Метод магнезиальной палеотермометрии основан на изменении концентрации магния и величины отношения кальция к магнию в морской воде и в раковинах организмов в зависимости от географической широты и глубины. В основе этих изменений лежит температурный фактор. Между величиной отношения кальция к магнию в раковинах и температурой среды обитания существует обратная (гиперболическая) зависимость. Экспериментально доказано, что величина отношения кальция к магнию в искусственно осажденных карбонатах кальция также обратно пропорциональна температуре. На возможность определения температур по концентрации магния впервые указали К. Чей и Ч. Чилингар, а Т.С. Берлин и А.В. Хабаков [3, 4] разработали и широко применили химико-аналитический метод оценки температур по магнезиальности ростров белемнитов, основанный на определении магния тетраированием с трилоном Б. Было установлено, что для разных групп организмов характерно свое соотношение кальция и магния, соответствующее температуре среды обитания. Таким образом, были разработаны палеотемпературные шкалы для различных организмов [11]. Несмотря на постоянное совершенствование методики, до сих пор считается, что солёность морских вод ограничивает применение магнезиальной палеотермометрии. Поэтому для снятия «фона» солёности при палеотемпературных исследованиях привлекались только стеногалинные организмы (белемниты, брахиоподы, кораллы, рудисты, крупные фораминиферы). Однако полностью преодолеть этот недостаток не удается.

В основе извлечения палеотемпературной записи из ледниковых кернов также лежит изотопный метод. По соотношению во льду дейтерия (тяжелого изотопа водорода  $^2\text{H}$ ) и обычного водорода можно судить о температуре воздуха в период образования этого льда, поскольку при конденсации паров воды более тяжелые (т.е. содержащие дейтерий) молекулы требуют меньшего охлаждения. Поскольку возраст льда в определенной степени характеризует глубина его местонахождения в толще ледника, то изотопное соотношение тяжелого и обычного водорода позволяет получить динамику палеотемператур, привязанную к геохронологической шкале. Как показали исследования в Антарктиде, изменения содержания дейтерия в ледовом керне мощностью 3190 м (соответствует 740 тыс. лет), полученном на станции Купол С, теснейшим образом коррелируются с динамикой соотношения изотопов кислорода  $^{18}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}$  в морских донных осадках.

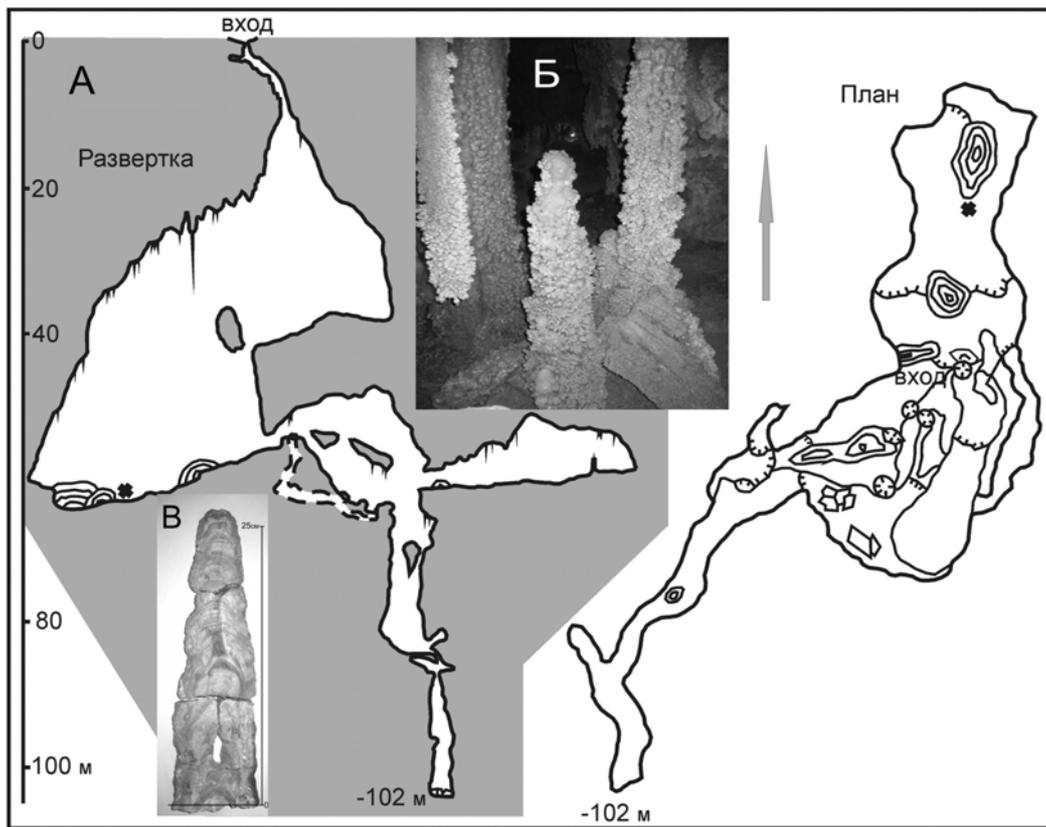
Таким образом, поскольку существующие методики извлечения палеоклиматических данных страдают определенными недостатками, необходимо применение комплексного подхода, разработка новых приемов и способов получения палеогеографической информации, верификация, корректировка и корреляция результатов, полученных с помощью разных изотопных методов. В частности изотопная палеотермометрия для карбонатных отложений должна использоваться при соблюдении следующих условий: наличии изотопного равновесия между отложившимся карбонатом и водой; постоянстве во времени изотопного состава кислорода карбоната с момента его отложения;

постоянстве во времени изотопного состава кислорода воды. Такие условия оптимально сочетаются в карбонатных натеках пещер, особенно сталагмитах. Это открывает широкие перспективы для их использования в качестве мощных депозитариев для получения палеоклиматической информации в континентальных обстановках. Пещерные летописи не ограничены распределением ледовых покровов и охватывают прошлое в широком диапазоне климатических условий и географических обстановок, что позволяет создавать ряды детальных региональных шкал, объединяемых в континентальные и глобальные палеоклиматические модели.

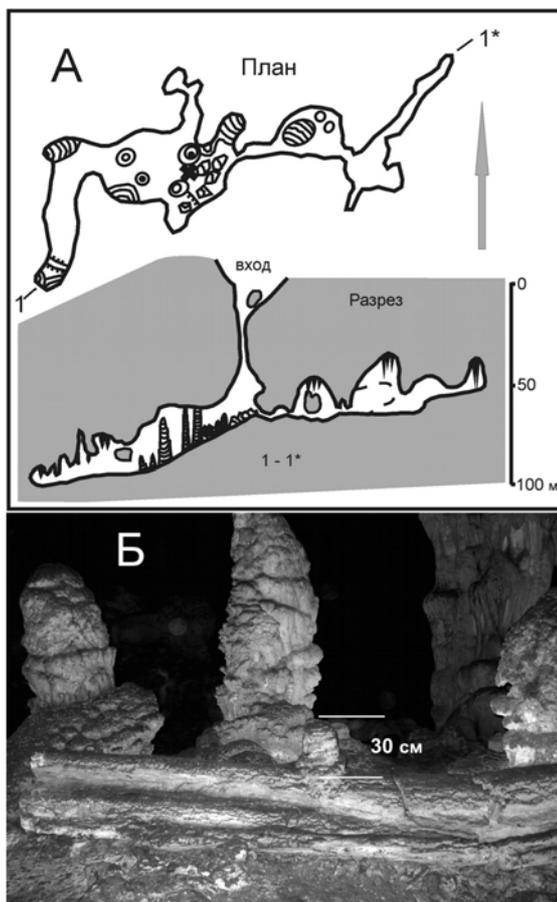
В течение последних 15 лет пещерные отложения (спелеотемы) безоговорочно признаны непревзойденными среди других типов континентальных образований по точности датирования и разрешающей способности палеоклиматических реконструкций в пределах последних 700 тыс. лет. Решающую роль в получении этого статуса сыграли исследования кальцитовых натечных образований с помощью прогрессивного  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  метода абсолютной датировки (термоионизационная масс-спектрометрия [13, 15]), а также изотопного (вариации изотопного состава  $^{13}\text{C}$  и  $^{18}\text{O}$  кальцита) и геохимического (лазерная абляция - индуктивная плазменная масс-спектрометрия [14]) изучения тонких слоев кальцитовых натеков. Совместное местонахождение натечных и других типов пещерных отложений создает широкие возможности для применения и взаимной верификации нескольких методов (палеомагнитного, палеонтологического, палинологического и др.).

Горный Крым обладает уникальными для восточно-европейского региона пещерными ресурсами (более 1200 карстовых полостей). Среди них разнообразны по морфологии и возрастному диапазону комплексы отложений, которые могут служить как опорные для создания более точной и детальной региональной (юго-восточная Европа и Черноморской регион) хронологии событий плейстоцена, чем существующие ныне схемы. Ранее эти возможности не использовались в Украине и смежных странах в связи с отсутствием соответствующего оборудования и дороговизной анализов в других странах. Теперь, благодаря установленному долгосрочному научному сотрудничеству, Украинский Институт спелеологии и карстологии (структурное подразделение Таврического национального университета им. В.И. Вернадского) получил не лимитированный доступ к современным лабораторным возможностям университета Миннесоты в США (абсолютное датирование и изотопные методы; рук. Л. Эдвардс) и университета Хасетепе в Турции (тонкая геохимия; рук. С. Баяри). Достигнуты взаимовыгодные договоренности с университетом Кёльна в Германии (абсолютное датирование и изотопные методы; рук. М. Штаубвассер). Это дает уникальный для Украины шанс создания на базе многочисленных крымских пещер уточненной региональной хронологии раннечетвертичных событий, которая будет интегрирована с глобальной спелеохемогенной шкалой, интенсивно разрабатываемой ведущими исследовательскими группами в США, Канаде, Бразилии, Китае и ряде европейских стран [8].

Пилотная коллекция, которая уже прошла датировку в США, кроме натеков из кавказских пещер Крубера (Kг) и Куйбышевской (Kb), включала серию образцов из пещер 200 лет Симферополя (С; рис. 2), Монастырь-Чокрак (М; рис. 3) и Красная (К; рис. 4) в Крыму. Возраст двух кавказских и пяти крымских образцов оказался древнее 500 тыс. лет. Сталагмит из пещеры Красной датирован по основанию (83 тыс. лет) и вершине (53 тыс. лет). Хронология палеогеографических событий, записанная в этом интервале, приходится на временной отрезок, который не пересекают известные европейские спелеотемные датировки (рис. 5). Поэтому в настоящее время образец (рис. 4, Г) проходит детальное послойное исследование - выявление вариаций палеотемператур в этом интервале. Даже первые предварительные результаты датировок опровергают ряд традиционных спелеогенетических представлений, например, о невозможности образования натеков в периоды оледенений в связи с нахождением воды в твердой фазе [17].



↑ Рис.2. План и разрез-развертка (А) пещеры 200 лет Симферополя, из донной части (Б) которой отобран сталагмит С1 (В) для абсолютной датировки. Место отбора здесь и далее указано на плане и развертке крестом.



← Рис.3. План и разрез (А) пещеры Монастырь-Чокрак и датированный сталагмит из подземного зала на глубине 80 м (Б). На фото видно, что 30-сантиметровый сталагмит М1, возраст которого согласно датировке превышает 500 тыс. лет, вырос на поваленной натечной колонне диаметром 0,7 м, имеющей еще более древний возраст. О времени формирования самой полости, где располагаются и колонна и сталагмит приходится пока только догадываться.

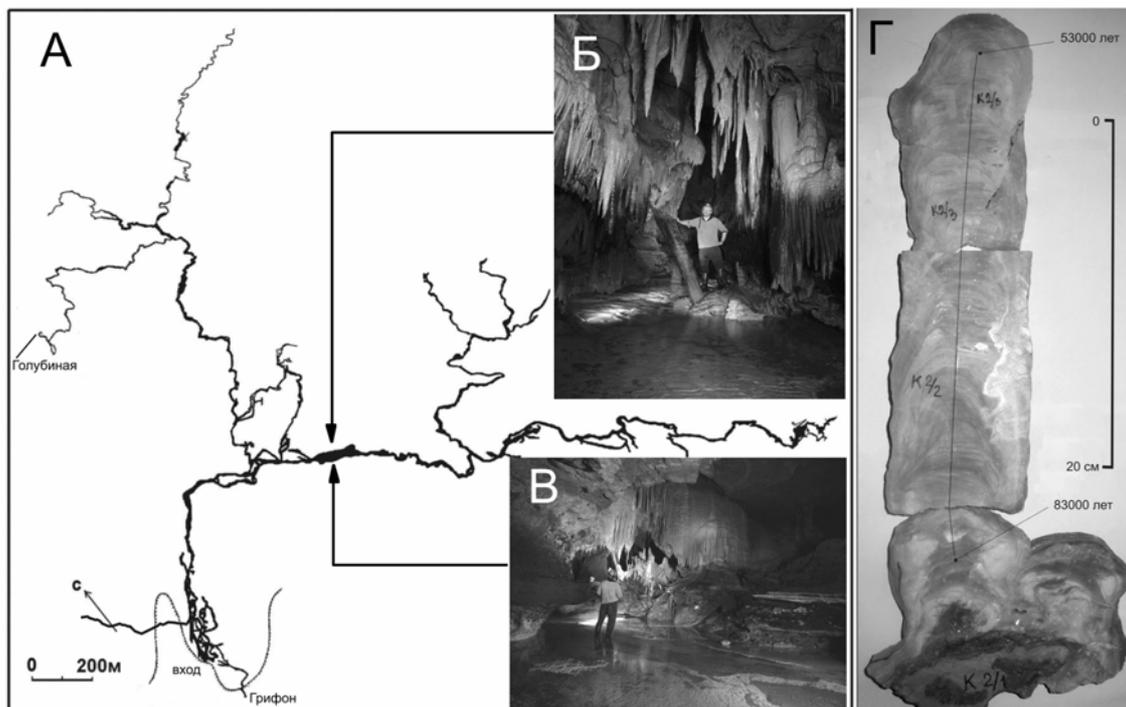


Рис.4. План (А) пещеры Красная и зал (Б, В), где был отобран сталагмит К2 (Г) для абсолютной датировки.

Участие специалистов УИСК в международной программе по изучению климатических изменений плейстоценовой эпохи предусматривает проведение региональных комплексных спелеологических исследований в Горном Крыму с помощью современной приборной базы, новых технологий сбора и первичной обработки аналитического материала, предоставленных зарубежными партнерами. В первую очередь будут детально исследованы крупные карстовые полости, на базе которых созданы спелеологические стационары. К ним относятся пещеры Эмине-Баир-Хосар и Мраморная на плато Чатырдаг, пещера Красная на Долгоруковском массиве и пещера Скельская на Ай-Петринском массиве. Эти полости вмещают уникальное по происхождению и возрастному диапазону разнообразие вторичных минеральных образований и отложений [1, 2, 5, 7]. Седиментационный комплекс кальцитовых агрегатов в этих пещерах является редчайшей за детальностью записью изменений тектонических, гидрологических, геоморфологических и климатических условий, по крайней мере, с раннеплейстоценового времени. Отложения верхней части пещеры Эмине-Баир-Хосар содержат огромное местонахождение ископаемой плейстоценовой (а возможно и более древней) фауны.

Программа предусматривает создание представительных опорных коллекций спелеотемного материала (преимущественно сталагмитов) и его системное исследование методами изотопной геохимии и датировок. Образцы отбираются из обломанного естественным путем материала на основе ряда критериев пригодности к датировке. Сталагмиты распиливаются по вертикали вдоль линии роста. Производится оценка степени кристаллизации осевой части натечков, и после соответствующей подготовки, они датируются по вершине и основанию. В случае попадания образца в датировемый интервал, интересный для палеореконовструкций, производится его дальнейшее детальное послойное исследование - датирование и анализ изотопии кислорода кальцита и флюидных включений для выявления палеотемпературы инфильтрационных вод, соответствующей среднегодовой температуре на поверхности.

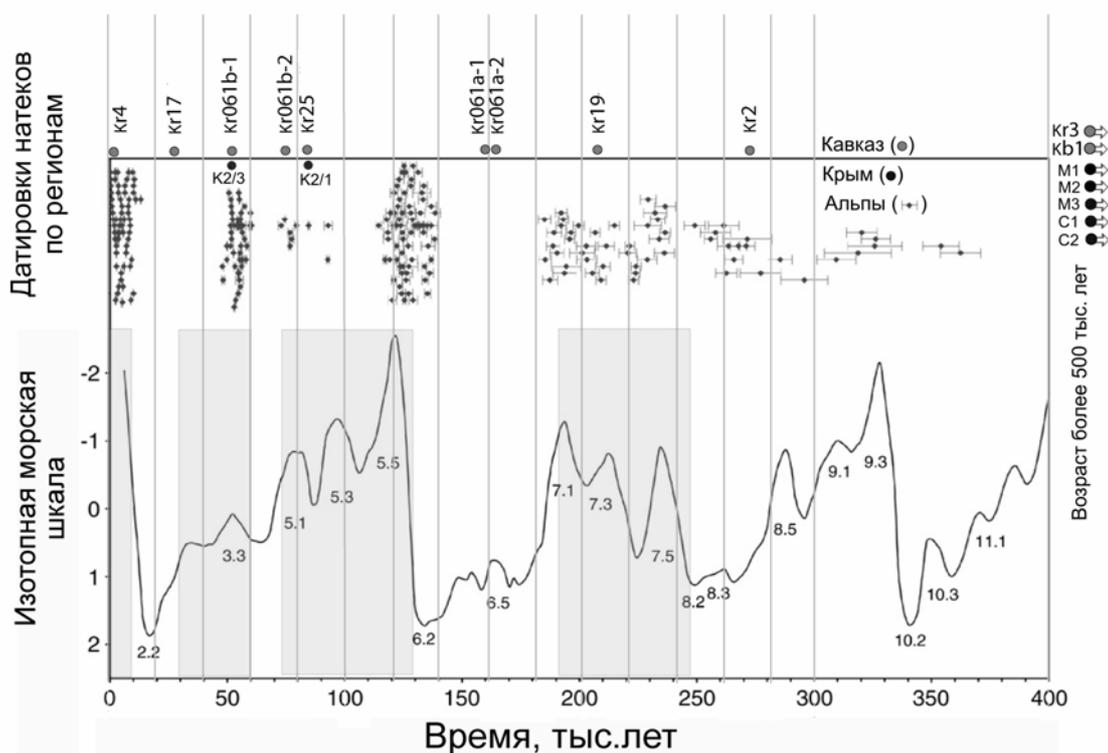


Рис. 5. Абсолютный возраст натечков из пещер Альп, Крыма и Кавказа и морская изотопная шкала средне-позднечетвертичных климатических изменений [9, 12, 17]

В ходе дальнейших исследований будет выполнено трехмерное морфогенетическое и седиментационное картирование исследуемых пещер, с предварительным выделением генетических и возрастных комплексов. Основой опорной шкалы и палеоклиматических реконструкций будут массовые датирования  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  методом различных генераций натечных образований и их тонкой структуры, произведенные в комплексе с изотопными и геохимическими исследованиями по тем же образцам. Также будет выполнен детальный анализ магнитных свойств как хемогенных натечных, так и кластических отложений, установлена палеомагнитная хронология натечных образований возрастом до 700 тыс. лет (сегодняшний лимит  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  метода). Будут проведены палеонтологические исследования уникальных местонахождений четвертичной фауны (28 пещер с редкими тафоценозами), минералогические исследования кластических отложений (более 130 пещер), анализ распределения поваленных натечных колонн и сталагмитов (14 пещер), что при наличии опорных датировок позволит выполнить детальные палеозоологические, палеогеоморфологические и палеосейсмические реконструкции. Все типы полученных ретроспективных моделей будут подвергнуты хронологической корреляции.

Таким образом, проведенные исследования подготовят новую базу для воссоздания реальной природной обстановки плейстоценовой эпохи на юге Украины и позволят сформировать новый, более совершенный палеогеографический эталон регионального уровня, вписанный в систему глобальных временных реперов. Это приведет к решению ряда проблемных вопросов региональной геологии и палеогеографии и интеграции дальнейших украинских исследований с современными мировыми программами по этой тематике.

### Литература

1. Амеличев Г.Н. Методы морфолитогенетического анализа грубообломочных отложений и палеогеографическая интерпретация их результатов (на примере массива Чатырдаг, Горный Крым) / Г.Н. Амеличев // Уч. Записки ТНУ, сер. География. - 2002. - №15(54), вып. 2. - С.86-97.
2. Амеличев Г.Н. Скельская пещера: состояние изученности, проблемы охраны и использования / Г.Н. Амеличев // Спелеология и карстология. - 2008. - №1. - С.94-99.

3. Берлин Т.С. Химико-аналитические определения отношения кальция и магния в рострах белемнитов как метод оценки температур среды обитания в морях мелового периода СССР / Т.С. Берлин, А.В. Хабаков // *Геохимия*. – 1966. - №11. – С.1359-1364.
4. Берлин Т.С. Результаты сравнения Са/Мг отношений и температур по изотопам  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в рострах юрских и раннемеловых белемнитов / Т.С. Берлин, А.В. Хабаков // *Геохимия*. – 1970. - №8. – С.971-978.
5. Вахрушев Б.А. Мраморная пещера / Б.А. Вахрушев, Г.Н. Амеличев, Е.Н. Семенова // *Пещеры*. – Пермь, 1999. - Вып.25-26. – С. 37-47.
6. *Геологический словарь*. / [авт. текста М. Голубчина]. – М. : Недра, 1978. – Т.2. – 456 с.
7. Красная пещера (опыт комплексных карстолого-спелеологических исследований). / [Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Шутков Ю.И.]. – М. : РУДН, 2002. – 190 с.
8. Климчук А.Б. К созданию региональной спелеотемной хронологии климатических событий плейстоцена / А.Б. Климчук, Б.А. Вахрушев, Г.Н. Амеличев // *Географія в інформаційному суспільстві*. – К. : Обрії, 2008. – т.3. – С.141-143.
9. Климчук А.Б. Датирование натечных отложений из глубоких частей глубочайшей пещеры мира – Крубера (массив Арабика, Западный Кавказ) / А.Б. Климчук, Г.В. Самохин, Х. Чен, Л. Эдвардс. // *Спелеология и карстология*. - 2008. - №1. – С.105-108.
10. Котляков В.М. Природные льды планеты Земля / В.М. Котляков // *Наука и человечество*. – М. : Знание, 1986. – С.91-121.
11. Славин В.И. Методы палеогеографических исследований / В.И. Славин, Н.А. Ясаманов. – М. : Недра, 1982. – 254 с.
12. Bassinot F.C. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal / F.C. Bassinot, L.D. Labeyrie, E. Vincent, X. Quidelleur, N.J. Shackleton, Y. Lancelot // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1994. – 126. – P.91-108.
13. Edwards R.L.  $^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$  systematic and the precise measurement of time over the past 500000 years / R.L. Edwards, J.H. Chen, G.J. Wasserburg // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1987. – 81. – P.175-192.
14. Fairchild I.J. Modification and preservation of environmental signals in speleothems / I.J. Fairchild, L. Claire // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – 75. – P.105-153.
15. Gascoyne M. Palaeoclimate determination from cave calcite deposits / M. Gascoyne // *Quaternary Science Reviews* - 1992. - Vol. II. - P.609-632.
16. Molodkov A.N. Long-term palaeoenvironmental changes recorded in palynologically studied loess-palaeosol and ESR-dated marine deposits of Northern Eurasia: Implications for sea-land correlation / A.N. Molodkov, N.S. Bolikhovskaya // *Quaternary International* - 2006. - Vol. 152-153. – P. 37-47.
17. Spötl C. Speleothems and paleoglaciators / C. Spötl, A. Mangini // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2007. – 254 (3). – P.323-331.

**Анотація.** У статті наведені відомості що до особливостей створення та використання ізотопних палеокліматичних шкал, які засновані на даних вивчення морських відкладів і льодовикових кернів. Розглянуто переваги палеокліматичних літописів спелеотемного походження. Наведені результати перших датувань з печер Криму і Кавказу.

**Ключові слова:** палеоклімат, ізотопна термометрія, спелеотеми, абсолютне датування, палеотемпературна шкала.

**Abstract.** In article data on features of creation and use of isotope paleotemperatures the scales based on data of studying of sea deposits and glacial cores are resulted. Advantages of paleoklimatics the records which are based on speleotheme are considered. Results of the first datings from caves of Crimea and Caucasus are resulted.

**Keywords:** paleoclimate, isotope thermometry, speleotheme, absolute dating, paleotemperature scale.

Поступила в редакцію 26.05.2009 г.